

ANALYSE DES SIGNAUX VIBRATOIRES D'UN REDUCTEUR A ENGRENAGE PAR LE CEPSTRE SYNTHRONE EN VUE D'UN DIAGNOSTIC PRECOCE

D. Chikouche**, N. Haloui*, R. E. Bekka**

* Ecole Supérieure d'Electricité (Université Paris-Sud)

3, Rue Joliot-Curie 91192 Gif-Sur-Yvette, Cedex, France

** Labo LIS, Département d'Electronique, Université de Sétif, Algérie

E-mail : dj_chikou@yahoo.fr

Abstract

The gear reducers are present in all mechanical machines. Researchers are still very interested in the study of gear reducers because of their relative weakness. In this paper, we propose indicators for the fault diagnosis of a gear reductor made of two toothed wheels operating at constant conditions. This technique is based on the synchronous cepstral analysis of the vibration signal delivered from the gear reductor system under study. The relationship between this technique and the vibration signal characteristics will be shown. The performances of the cepstre technique are demonstrated relatively to the expertise report.

Résumé

La surveillance et le diagnostic des réducteurs complexes à engrenages constituent un domaine d'intérêt grandissant dans plusieurs secteurs industriels. Dans cet article, nous proposons des indicateurs pour le diagnostic d'un réducteur complexe à engrenages composé de deux roues dentées fonctionnant sous des conditions normales. Ces indicateurs sont basés sur l'analyse cepstrale des vibrations du système à engrenages sous test. Le lien entre cette technique proposée et les caractéristiques du signal sera mis en évidence. Les performances de la méthode sont démontrées relativement au rapport d'expertise..

Mots clés

Analyse vibratoire, diagnostic, spectre, engrenage, modulation.

1. Introduction

L'étude des vibrations prenant naissance dans les systèmes mécaniques en général et les machines tournantes en particulier relève des techniques diverses pour analyser leurs défauts [1-13]. Les techniques actuelles de surveillance des machines tournantes à engrenages sont basées sur l'analyse de Fourier. Elles donnent de bons résultats pour le diagnostic des réducteurs à engrenages dans une machine tournante [1,2].

L'objet de cet article est de proposer une procédure de traitement capable de désigner l'organe tournant qui développe un défaut dans un réducteur complexe à engrenage. Cette procédure est basée sur l'analyse des vibrations d'un engrenage par la technique à base du cepstre synchrone [1-4].

Une fois la roue défectueuse trouvée, nous montrons que cette technique proposée peut encore être utilisée pour localiser le défaut du réducteur en étude.

2. Position du problème

Le dispositif d'enregistrement est le suivant [5,4]:

Les signaux vibratoires issus du réducteur à engrenages sur lesquels nous avons appliqué les méthodes étudiées ont été fournis par le CETIM¹ (Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques, 52 av. Felix Louat, 60300 Senlis). Ils proviennent d'un réducteur fonctionnant 24h/24h. Le dimensionnement des roues d'engrenages cémentés trempés, ainsi que les conditions de fonctionnement (vitesse, couple) sont fixés de façon à obtenir un écaillage sur toute la largeur d'une dent [3-5]. Durant l'expérimentation, le banc a été arrêté chaque jour pour observer l'état des dents de roues. Un rapport d'expertise est ainsi rédigé (Tableau. 1). Les caractéristiques du système sont [4]:

* Le nombre de dents est respectivement 20 dents sur la 1^{ère} roue et 21 dents sur la 2^{ème} roue.

* La vitesse de rotation de l'arbre d'entrée du réducteur est de $Rpm=1000tr/min$, soit une fréquence de $fr=16,67\text{ Hz}$ et de $15,87\text{ Hz}$ sur l'arbre de sortie..

* La fréquence d'engrènement est $f_e = 333.33$ Hz.

Un enregistrement a été effectué chaque jour pendant une période de 12 jours, sachant que la machine a tourné en permanence durant ces 12 jours.

- Chaque enregistrement comporte environ 60000 points, soit à peu près 50 périodes de rotation.

- La fréquence d'échantillonnage est de 20 kHz.

Au cours de l'expérimentation, l'engrenage de test passe de l'état de bon fonctionnement à celui d'un engrenage détérioré.

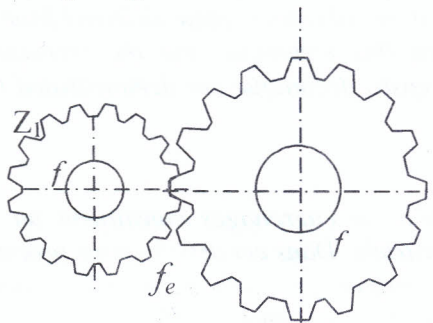


Fig. 1. Système d'engrenage

Le problème est le suivant:

Nous allons examiner comment s'effectue la détection de défauts par l'analyse cepstrale synchrone ainsi que leur localisation. La localisation dans ce cas revient à préciser quelle est la roue défectueuse.

Tableau 1. Rapport d'expertise [5]

Jours	Observations
1	Premier jour d'acquisition, pas d'anomalie
2	Pas d'anomalie
3	// //
4	// //
5	// //
6	Ecaillage dent 1/2
7	Pas d'évolution
8	Dent 1/2 pas d'évolution, dent 15/16 début d'écaillage
9	Evolution de l'écaillage dent 15/16
10	// //
11	// //
12	Ecaillage sur toute la largeur de dent 15/16

Dans la section suivante, nous allons d'abord décrire le signal d'engrènement.

3. Modulation du signal d'engrènement

Le signal d'engrènement est causé principalement par les chocs entre les dents des roues qui composent le réducteur. L'importance

du choc dépend de la forme des dents en fonctionnement sein et de la nature du défaut en fonctionnement dégradé [2-3].

Le signal d'engrènement $s_e(t)$ est modulé en fréquence et en amplitude par les signaux $s_{r1}(t)$ et $s_{r2}(t)$ émis par le pignon et la roue dont les fréquences sont respectivement f_{r1} et f_{r2} . Ces modulations, multiplicatives et convoluées avec les harmoniques produites par l'engrènement, sont définies par [2]:

$$s_e(t) = \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_c(t - nT_e) \right) \left(1 + \sum_{v=-\infty}^{+\infty} s_{r1}(t - vT_{r1}) + \sum_{l=-\infty}^{+\infty} s_{r2}(t - lT_{r2}) \right) \quad (1)$$

Avec:

$x_c(t)$ le signal produit par le choc entre deux dents de l'engrenage.

$T_e = 1 / f_e$ la période d'engrènement.

$T_{r1} = 1 / f_{r1} = N_1 \cdot T_e$ (Période de rotation de la roue 1, et N_1 son nombre de dents).

$T_{r2} = 1 / f_{r2} = N_2 \cdot T_e$ (Période de rotation de la roue 2 et N_2 son nombre de dents).

La transformée de Fourier (TF) du signal $s_e(t)$ est:

$$S_e(f) = X_c(f) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nT_e) + X_c(f) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nT_e) * S_{r1}(f). \quad (2)$$

$$\sum_{v=-\infty}^{+\infty} \delta(f - vT_{r1}) + X_c(f) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nT_e) * S_{r2}(f) \cdot \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \delta(f - lT_{r2})$$

Où: δ est la distribution de Dirac

Le traitement spectral des données par les techniques étudiées sera présenté dans la section suivante.

4. Présentation des techniques d'analyse vibratoire

4.1. Cyclostationnarité à l'ordre 1: moyenne synchrone

La moyenne d'une fonction aléatoire du temps

$x(t)$ est définie par $\bar{x}(t) = E[x(t)]$. Dans le cas général, cette moyenne dépend du temps (t). Dans le cas d'un signal stationnaire cette moyenne est constante, et pour un signal cyclostationnaire, elle est périodique [1,3].

La cyclostationnarité à l'ordre un est l'un des outils pour le diagnostic des défauts des réducteurs à engrenages. Pour le type de réducteur en étude qui comporte un pignon de période T_1 , et une roue de période T_2 [2,3], on montre que le signal est cyclostationnaire aux périodes T_1 et T_2 [3, 33]. Il est possible dans notre application d'estimer la moyenne

synchrone par rapport à l'une de ces périodes de la façon suivante :

$$p(\theta) = 1 / N \sum_{k=0}^{N-1} s(\theta + k \cdot \theta_{\text{motif}}) \quad (3)$$

Le signal est découpé en N blocs de θ_{motif} échantillons.

4.2. Le cepstre

Le signal d'engrènement est modulé en fréquence et en amplitude par les signaux $s_{r1}(t)$ et $s_{r2}(t)$ émis par le pignon et la roue (1). Le cepstre est l'un des outils de détection des périodicités des signaux, comme il est très sensible aux signaux de type impulsionnel [3]. Le cepstre d'un signal $x(t)$ est défini par:

$$C_x(t) = TF^{-1}[\ln|X(f)|^2] \quad (4)$$

où: TF^{-1} est la transformée de Fourier inverse.

$X(f)$ la transformée de Fourier de $x(t)$.

5. Traitement temporel des données et interprétation

La méthode du cepstre synchrone est appliquée au signal vibratoire émis par le système d'engrenage sous test.

D'après la figure 2, nous avons constaté que la représentation temporelle des signaux observés chaque jour présente des oscillations qui sont causées par l'engrènement et une modulation de longue durée correspondant à la période des deux roues (pignon de 20 dents et roue de 21 dents). Le signal vibratoire conserve cette forme jusqu'au 12^{ième} jour pendant lequel le défaut est supposé apparaître. Nous remarquons une augmentation très élevée de l'amplitude du signal autour des modulations par rapport aux oscillations entre ces dernières. Ces remarques permettent de diagnostiquer un défaut aux 12^{ième} et 13^{ième} jours.

6. Moyenne synchrone et spectre

Nous avons montré dans la partie 2, que le signal vibratoire (signal d'engrènement) est modulé par le signal du pignon et de la roue. Nous effectuons la moyenne synchrone sur le signal vibratoire pour la séparation et l'élimination des composantes du bruit qui l'entache. Nous allons montrer sur la figure 3 l'évolution du spectre du signal vibratoire (jour 4) obtenu avant et après la moyenne synchrone.

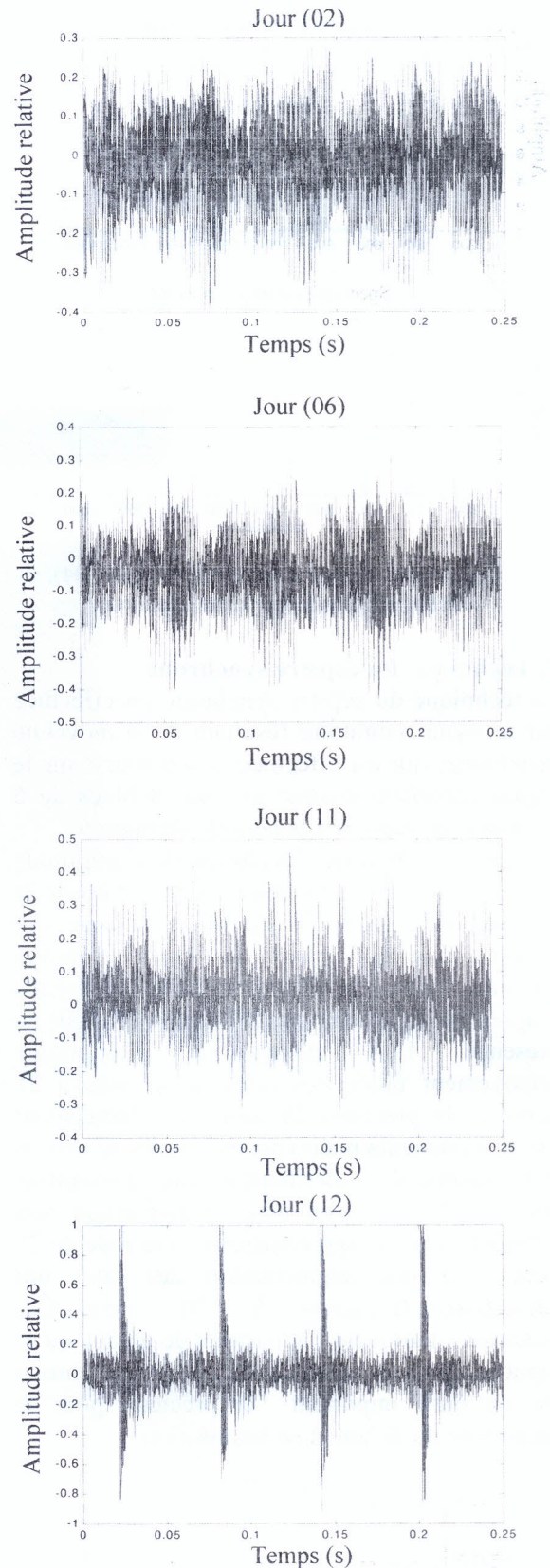


Fig. 2. Vibration enregistrée les jours 2, 6, 11 et 12. Visualisation sur 4 périodes de rotation, par rapport au pignon.

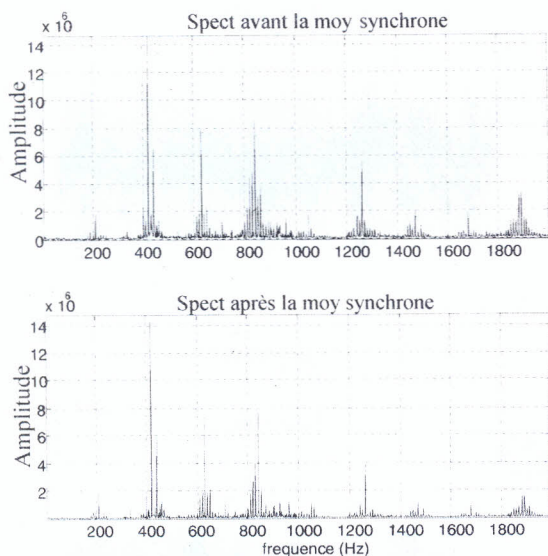


Fig. 3. Spectre du signal vibratoire (jour 04), avant et après la moyenne synchrone

7. Technique du cepstre synchrone

La technique du cepstre synchrone est effectuée sur le signal vibratoire résultant de la moyenne synchrone, qui est effectuée, à son tours, sur le signal enregistré chaque jour sur 8 blocs de 6 périodes par rapport à la période du pignon. La figure 5 présente l'évolution de l'amplitude des raies qui correspondent aux multiples de la période du pignon (20 dents) et la roue (21 dents) durant les 12 jours de l'expérimentation obtenue d'après la figure 4. Nous observons d'après la figure 5, du 2^{ème} au 6^{ème} jour la présence d'un changement d'amplitude relativement faible des raies de la roue à 21 dents et du pignon à 20 dents. Ce changement est dû à plusieurs phénomènes, comme le niveau et la qualité du lubrifiant à titre d'exemple. Au 6^{ème} jour, on note la disparition non complète des pics qui caractérisent la roue de 21 dents et une augmentation des raies qui caractérisent le pignon à 20 dents. Ces remarques indiquent l'apparition de défaut sur le pignon. Donc la méthode du cepstre synchrone est un outil important et précieux pour le diagnostic du défaut et sa localisation.

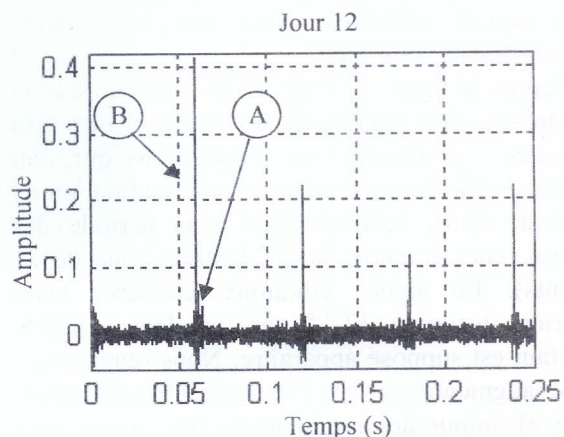
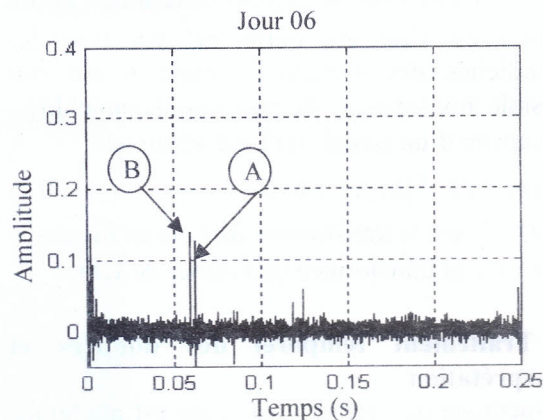
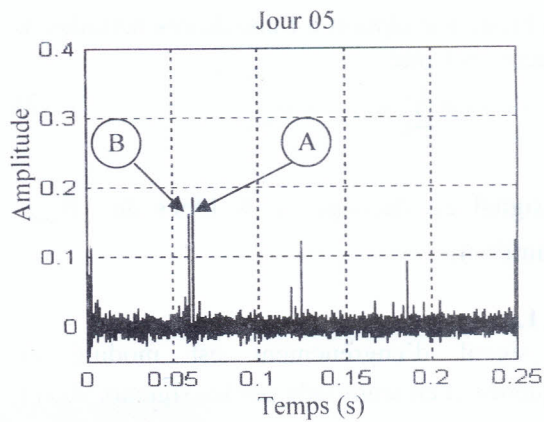
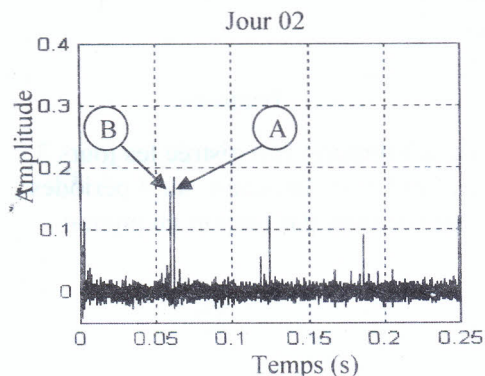


Fig. 4. Le cepstre du signal enregistré Jours 2, 9 et 13.

A : Raie de la roue à 21 dents
B : Raie de la roue à 20 dents

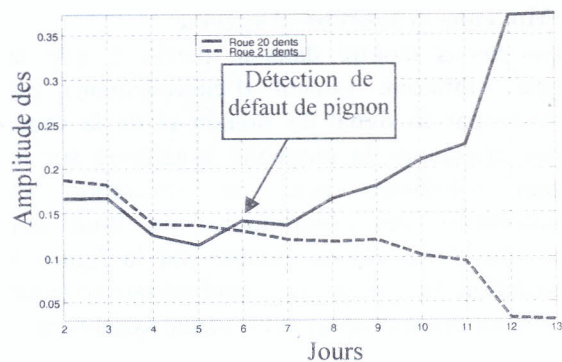


Fig. 5. Evolution des raies pendant 12 jours (Méthode du cepstre synchrone)

10. Etude comparative des méthodes relativement au rapport d'expertise

Le tableau 2 présente le jour de détection du défaut par les techniques étudiées selon l'évolution des raies qui correspondent aux fréquences de rotation de la roue à 21 dents, et le pignon à 20 dents.

Tableau 2. Jour de détection du défaut

Jours	Cepstre synchrone
2	Pas de défaut
3	//
4	//
5	//
6	Détection de défaut
7	Pas d'évolution
8	Evolution de défaut
9	//
10	
11	//
12	//
13	//

La méthode étudiée (cepstre synchrone), que nous avons appliqué sur le signal vibratoire émis par le système d'engrenages en étude a révélé qu'elle met en évidence la présence de deux modulations alors que sur le signal temporel, il semble n'en exister qu'une. Cette méthode permet en plus de mesurer avec une précision les périodes respectives de ces deux modulations. Elle détecte la présence de défaut sur le pignon (roue à 20 dents) au 6^{ème} jour selon le changement de la nature des vibrations, alors que le signal temporel, ne présente pas encore de particularités caractéristiques de l'apparition d'un défaut jusqu'au 12^{ème} jour.

Par ailleurs, cette étude montre selon le rapport d'expertise qu'elle peut être intéressante dans le cadre de la surveillance des réducteurs complexes à engrenages. Il s'agit souvent de suivre de façon précise l'évolution des raies particulières, en amplitude et en fréquence, dont un but de détection du défaut et sa localisation.

11. Conclusion

Nous avons étudié dans cet article les performances de la technique du cepstre synchrone, et les possibilités qu'elle nous offre de surveiller et diagnostiquer un système d'engrenages. L'application de cette technique au signal vibratoire nous permet de décrire le comportement des vibrations d'engrenages. En effet, l'état d'usure d'un réducteur est fortement lié aux phénomènes de modulation que présentent les vibrations par rapport au signal

d'engrènement. En plus de sa simple implémentation, la technique du cepstre synchrone présente une bonne résolution fréquentielle pour la séparation des différentes composantes fréquentielles. Elle est très efficace dans le cadre du diagnostic des défauts de réducteurs à engrenages dans les machines tournantes.

Références

- [1] M. Durnerin, N. Martin, C. Mailhes, Prieur, G. Lejeune, J. Lineard, J. L. Lacoume, F. Castanié, P. G. Goullet, A. Silvent, "Démarche d'analyse spectrale en vue d'une interprétation automatique, application à un signal d'engrenages", *Seizième Colloque GRETSI*, 15-19 septembre 1997, Grenoble, pp.539- 542.
- [2] G. Lejeune, J.L. Lacoume, P. Marchand, M. Durnerin, N. Martin, J. Liénard, A. Silvent, Cephag, C. Mailhes, F. Castanié, "Cyclostationnarités d'ordre 1 et 2 : application à des signaux Vibratoires d'engrenages", *Seizième Colloque GRETSI*, 15-19 Septembre 1997.
- [3] M. El Badaoui, F. Guillet, J. Danière, "Contribution du cepstre d'énergie au diagnostic des de réducteur complexe à engrenages", *3^{ème} Conférence Internationale Méthodes de Surveillances et Technique de diagnostique Acoustique et Vibration*, Senlis, France, 13-15 octobre 1998.
- [4] N. Haloui, D. Chikouche, M. Benidir, "Application des méthodes d'analyse spectrale paramétriques à la détection des Défauts d'Engrenages dans les machines tournantes", *IEEE CCECE'02 Proceedings*; ISBN: 0- 7803- 7514-9; vol. 1, pp. 190-194, 13-15 mai 2002.
- [5] K. Drouiche, M. Sidahmed, Y. Grenier, "Détection de défauts d'engrenages par analyse vibratoire", *Traitement du signal*, vol. 8, N° 5, pp. 331-343, 1992.
- [6] P. Prieur, G. D'Urso, "Des indices de cyclostationnarité pour la surveillance des engrenages", *Quinzième Colloque GRETSI*, Juan- Les-Pins du 18 au 21 septembre 1995, pp. 1241-1247.
- [7] C. Fontanive, P. Prieur, "Surveillance et diagnostic des engrenages", *Progrès récents des méthode de surveillances acoustiques et vibrations*, senlis, 27- 29, Octobre 1992, pp.693- 694.

- [8] C. H. Page, "Instantaneous power spectra", *Journal of Applied Physics*, vol. 23, N°1, pp.103-106, 1953.
- [9] R. Koifman and Y. Meyer, "Remarques sur l'analyse de Fourier à fenêtre", *C. R. Acad. Sci. Serie I*, vol. 312, pp. 259-261, 1991.
- [10] J. F. Cardoso, "Source separation using higher-order moments", *Proceedings of the IEEE International Conference on ASSP*, Glasgow, Scotland, May 1989.
- [11] S. M. Kay, "Modern spectral estimation", *Printice hall signal processing series*, Englewood cliffs, New Jersey 07632, 1988.
- [12] S. Kay, S. L. Marple, "Spectrum Analysis-A modern perspective", *Proc. IEEE*, vol. 69, N°11, Nov 1981, pp.1380-1419.
- [13] D. Chikouche, N. Haloui, K. Bdirina, "Détection des défauts d'engrenages par les techniques autoregressives", *1^{ère} Conférence sur les systèmes électroniques CISE'05*, Université de Batna, 13-14 Déc. 2005, pp. 11-15.